

Рисунок 2 – Расчет магнитного поля электрической машины (а), распределении индукции в воздушном зазоре при холостом ходе (б) и при номинальной нагрузке (в): 1 – статор; 2 – постоянный магнит; 3 – катушка статора; 4 – экранирующее стальное кольцо; 5 – маховик.

Выводы

Применение инерционного электромеханического накопителя энергии является перспективной технологией энергосбережения. Предложен подход к выбору его основных геометрических и электрофизических параметров для обмена энергией в тяговом приводе электрического подвижного состава. Решена тестовая задача, по результатам которой установлено, что инерционный электромеханический преобразователь с приведенными параметрами может обеспечить энергию обмена в 6,3 МДж.

Следует отметить, что важным требованием при функционировании такой системы является необходимость обеспечить управляемый переток мощности между тяговым электродвигателем и инерционным накопителем энергии при встречно меняющихся оборотах упомянутых электромеханических устройств в генераторном и двигательном режимах их работы. Удовлетворить это требование возможно применением реверсивного buck & boost DC-DC – преобразователя, позволяющего в заданном диапазоне, контролируемо изменять напряжение на входе и выходе накопителя и тягового электродвигателя.

Список литературы: 1. Maruyama, N. Stabilisierung der Fahrleitungsspannung mittels Schwungrad. [Text] / N. Maruyama // Elektrische Bahnen. – 1992(90). – №4. P.125–129. 2. Стационарные накопители энергии на метрополитене Гамбурга [Текст] // Железные дороги мира. – 2010. – № 7. – С. 60–64. 3. Омельяненко, В. И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения. [Текст] / В. И. Омельяненко, Г.В. Омельяненко // Техническая электродинамика. – 2002. – №4. – С.83–88. 4. Дизель-поезд Lirex [Текст] // Железные дороги мира. – 2001. – № 2. – С. 35– 42. 5. Омельяненко, В.И. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения. [Текст] / В.И. Омельяненко, Г.В. Омельяненко. // Электромеханика. – 2001. – №4-5. – С.67–74. 6. Kratki, N. Ausgleichsvorgänge und Schwingungen beim elektrodynamischen Magnetkissen-System-[Text] / N. Kratki, K. Oberreiff // Archiv für Elektritechnik. - 1975. - Band 57. - Heft 2. - p.59-64.

Поступила в редколлегию 09.04.2012

УДК 629.423.1

С.Ю. ЧЕРВ'ЯКОВ, студент НТУ «ХП»;

Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»;
М.М. КАЛЮЖНИЙ, доц. НТУ «ХПІ»

СИЛИ ОПОРУ РУХУ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Проведено дослідження природи та характеру сил опору, що впливають на рух електрорухомого складу.

Проведено исследование природы и характера сил сопротивления, которые влияют на движение электродвижущего состава.

A research on the nature of the resistance that influences the motion of a train was done.

Поїзд при русі зазнає протидію багатьох сил, різних за причинами виникнення, природою і величиною. Деякі з них змінюються повільно, інші більш швидко, аж до імпульсного впливу. Багато з цих сил взаємопов'язані, багато випадкові. Прийнято оцінювати сумарний ефект від усіх сил протидії руху як опір руху поїзда. Відповідно до цього опором руху називають еквівалентну силу, наведену до обода коліс, на подолання якої витрачається така ж робота, як і на подолання всіх дійсних сил, протидіючих руху [1,2].

Метою даної роботи є дослідження сил, що діють на електрорухомий склад під час руху і здатні впливати на його рух.

Опір руху залежить від конструкції та технічного стану рухомого складу і верхньої будови шляху, профілю і плану шляху, від швидкості руху поїзда, а, також швидкості і напрямку швидкості вітру. Вона зумовлена наявністю тертя у вузлах рухомого складу, тертям коліс об рейки, деформаціями шляху і елементів рухомого складу, опором повітряного середовища, а також складовими сили тяжіння на ухилах.

Енергія, витрачена на подолання опору тертя, неповоротна, так як витрачається на стирання деталей рухомого складу, шляху і, перетворюючись на тепло, розсіюється в навколишньому середовищі. Неповоротна і енергія, що витрачається на подолання опору повітряного середовища. Енергія, витрачена на подолання підйомів, може бути частково, а в деяких випадках, наприклад на крутих спусках, майже повністю повернута в контактну мережу і використана для подолання опору руху поїздів, що рухаються на підйом.

Опір руху умовно ділять на дві головні складові: одну, що залежить від типу рухомого складу і швидкості його руху, та іншу, що залежить від плану і профілю колії, а також від особливих умов руху.

Першу складову називають основним опором руху W_0 ; вона являє собою опір руху рухомого складу даного типу на прямолінійній і горизонтальній відкритій ділянці шляху при будь-якій швидкості руху, в тому числі і при $v = 0$. Ця складова обумовлена внутрішнім тертям у

вузлах рухомого складу, опором, що виникає при взаємодії рухомого складу та колії, а також опором повітряного середовища (при відсутності вітру).

Другу складову називають додатковим опором руху $W_{\text{д}}$; він являє собою опір від ухилів та кривих. Вважають, що додатковий опір не залежить від швидкості руху і визначається тільки планом і профілем шляху. Розрізняють ще додатковий опір від вітру, опір при русі в тунелях, а також при температурах навколишнього середовища нижче 25°C .

Таким чином, опір руху поїзда:

$$W = W_{\text{о}} + W_{\text{д}}. \quad (1)$$

або при нормальних температурах навколишнього повітря і відсутності вітру:

$$W = W_{\text{о}} + W_{\text{і}} + W_{\text{кр}}. \quad (2)$$

де $W_{\text{і}}$ – опір руху від ухилів; $W_{\text{кр}}$ – опір руху від кривих.

Часто опір руху поїзда W представляють як суму опору руху локомотива W' і опору руху складу W'' :

$$W = W' + W''. \quad (3)$$

Такий поділ є умовним, він лише приблизно відображає дійсне співвідношення опору локомотива і складу в загальному опорі поїзда, так як ці складові фізично не віддільні одна від одної.

При виконанні тягових розрахунків опір руху, як і інші діючі сили, висловлюють в питомих одиницях і вводять в розрахунок середньозважений основний питомий опір руху поїзда, Н/т, який визначається за формулою:

$$W_{\text{о}} = \frac{w_{\text{л}} \cdot m_{\text{л}} + w_{\text{скл}} \cdot m_{\text{с}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}}, \quad (4)$$

де $w_{\text{л}}$ – головний питомий опір руху локомотиву, Н/т; $w_{\text{скл}}$ – головний питомий опір складу, Н/т; $m_{\text{л}}$, $m_{\text{с}}$ – маса локомотива та складу, відповідно, т.

Основний питомий опір руху електропоїздів залежить від їх складу. Встановити теоретично значення основного опору руху надзвичайно складно, тому що воно залежить від багатьох факторів, що змінюються в процесі руху випадково або за досить складними закономірностями. Тому основний опір руху визначають дослідним шляхом при випробуваннях рухомого складу на лінії.

Щоб отримати уявлення про фізичну природу значень окремих складових цього опору, його можливо розглянути у вигляді суми ряду компонент: опору від тертя в підшипниках рухомого складу; опору від тертя кочення коліс по рейках; опору від тертя ковзання по рейках; опору від деформації шляху, ударів на стиках і нерівностях; опору повітряного середовища. Такий поділ основного опору умовний, так як в дійсності деякі складові залежать одна від одної.

При русі коліс по рейках виникають втрати від сили тертя кочення, яка тим більше, чим менше діаметр колеса і чим м'якше поверхні колеса і рейок. Тому на ділянках з потужними термічно зміцненими рейками при хорошому стані верхньої будови шляху опір від тертя кочення найменше. Декілька зменшується тертя кочення по мірі зростання швидкості руху.

Кочення колеса по рейках супроводжується тертям ковзання, яке виникає внаслідок конусності профілю поверхні катання коліс, звивистості руху коліс при вписування їх в рейкову колію, нерівності діаметрів коліс однієї колісної пари, неправильної зборки екіпажної частини при ремонті, нерівномірного зносу і ін.

Рух рухомого складу по рейках супроводжується ударами, що виникають, в першу чергу, на стиках, внаслідок нерівностей шляху в профілі і плані, наявності лисок та інших нерівностей поверхні кочення коліс та ін. На удари витрачається кінетична енергія рухомого поїзда, для відновлення якої потрібна певна робота. Сила опору руху від ударів в значній мірі залежить від стану і розміру стиків, довжини редьсов, змісту рейкової колії. Застосування безстикової колії значно зменшує опір руху від ударів.

Частина енергії рухомого поїзда витрачається на деформацію верхньої будови колії, яка також створює опір руху поїзда. Воно залежить від ступеня деформації колії, навантаження від осі на рейки і швидкості руху.

Емпірично отримані функції для найбільш поширених складових потягу представлені в табл. [1,2].

В табл. коефіцієнт φ_0 позначає масу вагона, що припадає на вісь. В дипломній роботі використовується значення $\varphi_0 = 17$ т.

Дослідне визначення основного опору руху проводиться на спеціально обраних ділянках шляху. Достовірні результати отримують при експериментальному визначенні основного опору руху великого числа одиниць рухомого складу даного типу. Результати цих дослідів і розрахункові залежності основного опору руху рухомого складу залізниць наведені в табл.

Для електрорухомого складу умовно розрізняють опір руху в режимах тяги, електричного гальмування і вибігу.

При русі під струмом сили опору, викликані механічними втратами в тягових двигунах, моторно-осьових підшипниках і тяговій передачі, враховують у процесі розрахунку тягових і гальмівних характеристик. Тому при тязі, а також електричному гальмуванні розрахунковий опір руху менше, ніж в режимах вибігу і механічного гальмування на величину сил, що викликаються цими втратами. Це умовності розрахунку. Різниця в значеннях опору руху при розрахунках виходить тому, що при русі під струмом втрати енергії в тягових двигунах, моторно-осьових підшипниках і тяговій передачі, що враховуються в характеристиках двигунів, покриваються енергією, споживаної з контактної мережі; при русі на вибігу ці ж втрати компенсуються накопиченої кінетичної енергією електрорухомого складу, і

їх враховують, збільшуючи опір руху на ΔW . Величину ΔW визначають, прирівнюючи потужність втрат холостого ходу $P_{\text{хх}}$, Вт, в тягових двигунах і передачах додатку ΔW , Н, на швидкість v , м/с, руху електровоза. Звідси:

$$\Delta W = \frac{P_{\text{хх}}}{v}. \quad (5)$$

Таблиця – Опір руху потяга

Тип рухомого складу і режим роботи	Основний питомий опір руху, Н/т (при v в км/год)	
	На ланковій колії	На безстиківій колії
Електровози в режимі тяги	$w_p' = 19,64 + 0,098v + 0,0029v^2$	$w_p' = 18,64 + 0,078v + 0,0024v^2$
Електровози в режимі вибігу	$w_x = 23,54 + 0,108v + 0,0034v^2$	$w_x = 23,54 + 0,088v + 0,0034v^2$
Вантажні вагони чотирьохосні	$w_{14} = 6,87 + (29,43 + 0,98v + 0,0245v^2)/q_{10}$	$w_{14} = 6,87 + (29,43 + 0,88v + 0,0196v^2)/q_{10}$
Вантажні вагони шестиосні	$w_{16} = 6,87 + (78,48 + 0,9v + 0,0245v^2)/q_{10}$	$w_{16} = 6,87 + (78,48 + 0,78v + 0,02v^2)/q_{10}$
Вантажні вагони восьмиосні	$w_{18} = 6,87 + (58,9 + 0,373v + 0,0206v^2)/q_{10}$	$w_{18} = 6,87 + (58,9 + 0,255v + 0,0167v^2)/q_{10}$

Оскільки опір руху залежить від багатьох факторів, частина з яких ще недостатньо вивчена, експериментальні дані мають великий розкид. Наведені дані свідчать про те, що при розрахунку основного питомої опору руху не можна вважати його збільшення пропорційним довжині поїзда. Поздовжня динаміка призводить до відносних переміщень вагонів у складі, а отже, до збільшення опору руху. Особливо це проявляється при русі поїзда по переломів профілю, коли деякі частини складу стислі, інші розтягнуті. Основне питомий опір руху довгосоставних поїздів залежить також від місця розташування електровоза в поїзді: в голові, в середині або в кінці при підштовхуванні.

До додаткового опору руху відносять сили опору, що виникають при русі по ухилами і кривим. На рухомий склад, що знаходиться на прямолінійному ухилі, діє складова сили тяжіння. Ця сила направлена у бік спуску. Вона являє собою додаткове опір руху W_i від ухилу (рис.).

Крутизну ухилу профілю колії позначають i і виражають у тисячних частках; вона являє собою значення тангенса кута α нахилу профілю колії до горизонту, помножене на 1000, тобто:

$$i = 1000 \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

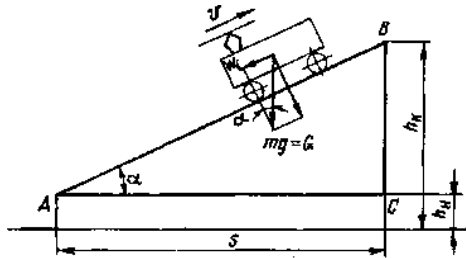


Рисунок – Додатковий опір від ухилу

Відповідно до рис. маємо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_k - h_H}{S}. \quad (7)$$

Отже, крутизна ухилу, ‰,

$$i = \frac{h_k - h_H}{S} 1000. \quad (8)$$

Таким чином, крутизну ухилу вимірюють числом метрів зміни висоти, що припадають на 1 км довжини шляху.

Додатковий опір руху, кН, потяги масою m т, від підйому:

$$W_i = mg \sin \alpha. \quad (9)$$

де $mg = G$ – вага поїзда масою m , кН.

Так як на реальному профілі колії кут α не перевищує $2,5^\circ$, можна вважати $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$; прийнявши вагу поїзда в ньютоних, отримаємо:

$$W_i = 1000 mg \operatorname{tg} \alpha = mgi. \quad (10)$$

Звідси питомий опір руху від підйому, Н/кН,

$$w_i = \frac{W_i}{mg} = i, \text{ ‰}. \quad (11)$$

Як видно з виразу (11), опір руху від підйому вважають не залежним від швидкості руху, ні від типу рухомого складу. Питоме його значення, Н/кН, чисельно прирівнюється крутизні підйому в тисячних.

Формула (11) справедлива і для руху по спуску. Однак при спуску складова сили тяжіння спрямована по руху поїзда і підсумовується з силою, що прискорює. Це враховують у формулі (11) тим, що на спусках величину i беруть негативною. Наприклад, на підйомі $i = 9$ ‰, додатковий питомий опір руху $W_i = 9$ Н/кН, а на спуску такої ж крутизни, тобто при $i = -9$, $W_i = -9$ Н/кН.

Таким чином, у формулі (11) під l розуміють не абсолютне, а алгебраїчне значення крутизни ухилу. Якщо питомий опір розглядається не в Н/кН, а в Н/т, тоді для його отримання слід значення крутизни ухилу помножити на прискорення g :

$$w_t = g l. \quad (12)$$

Додатковий опір руху на кривих ділянках шляху виникає через те, що відцентрова сила притискає гребені коліс до зовнішньої рейки, внаслідок чого зростають сили тертя. З ростом швидкості цей додатковий опір руху зростає. При збільшенні радіуса кривої зменшується відцентрова сила і відповідно додатковий опір руху. Крім того, в кривій внаслідок неминучого виникнення різниці кіл катання коліс зростають їх поздовжні і поперечні прослизання. Опір збільшується також в результаті зростання сил тертя в ходових частинах рухомого складу при повороті візків в момент входу і виходу з кривої. Цей опір знижується зі зменшенням жорсткої бази електровоза і вагонів: у візкових чотиривісних вагонів він менше, ніж у двовісних.

Через складність врахування впливу всіх діючих факторів зазвичай користуються емпіричної формулою, що враховує тільки основний фактор – радіус кривої. Вплив швидкості не враховують, вважаючи, що поїзди проходять криві з обмеженням швидкості. Саме на підставі дослідницьких даних додатковий питомий опір руху поїзда від кривої w_r можна приблизно підрахувати для магістральних і промислових доріг. Якщо довжина потяга менша за довжину кривої, то

$$w_r = \frac{6867}{R_k}, \quad (13)$$

якщо ж довжина потяга більша, ніж довжина кривої, то

$$w_r = \frac{6867}{R_k} \cdot \frac{S_{кр}}{l_n}, \quad (14)$$

де R_k – радіус кривої, м; $S_{кр}$ – довжина кривої, м; l_n – довжина потяга, м.

Додатковий опір руху виникає і під впливом вітру а також температури повітря.

Висновок. Досліджені природа та характер сил опору, що впливають на рух електрорухомого складу. Встановлені залежності щодо визначенні сил опору руху які можливо застосовувати при розробці програмного комплексу рішення тягової задачі руху поїзду по ділянці колії.

Список літератури: 1. *И.П. Исаев.* Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1995. – 297 с. 2. *В.И. Омеляненко, Н.Н. Калужный, Г.В. Омеляненко, Б.Г. Любарский.* Основы электрической тяги, системы и режимы тяговых сетей постоянного тока. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002.–164 с.

Надійшла до редколегії 03.04.2012